植物生态学报 2016, **40** (3): 0–0
Chinese Journal of Plant Ecology
doi: 10.17521/cjpe.2015.0152
http://www.plant-ecology.com

青藏高原高寒区阔叶林植被固碳现状、速率和潜力

王　建[1,2]　王根绪[1*]　王长庭[3]　冉　飞[1]　常瑞英[1]

[1]中国科学院成都山地灾害与环境研究所山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041; [2]中国科学院大学, 北京 100049; [3]西南民族大学生命科学与技术学院, 成都 610041

摘　要　为明晰青藏高原高寒区阔叶林植被碳储量现状及其动态变化特征, 利用森林资源清查数据和标准样地实测数据, 估算了青藏高原高寒区(青海和西藏两省区)阔叶林植被的碳储量、固碳速率和固碳潜力。结果表明: 2011年青藏高原高寒区阔叶林植被碳储量为310.70 Tg, 碳密度为89.04 Mg·hm^{-2}。六类阔叶林型(栎(*Quercus* spp.)林、桦木(*Betula* spp.)林、杨(*Populus* spp.)树林、其他硬阔林、其他软阔林和阔叶混交林)中, 阔叶混交林的碳储量最大, 杨树林碳储量最小; 其他硬阔林碳密度最大, 其他软阔林碳密度最小。空间分配上碳储量和碳密度表现为: 乔木层>灌木层>凋落物层>草本层>枯死木层。不同龄级碳储量和碳密度总体表现为随林龄增加逐渐增大的趋势。阔叶林碳储量从2001年的304.26 Tg增加到2011年的310.70 Tg, 年均固碳量为0.64 Tg·a^{-1}, 固碳速率为0.19 Mg·hm^{-2}·a^{-1}。不同林型固碳速率表现为其他软阔林最大, 其他硬阔林最小; 不同龄级表现为成熟林最大, 幼龄林最小。阔叶林乔木层固碳潜力为19.09 Mg·hm^{-2}, 且不同林型固碳潜力表现为栎林最大, 桦树林最小。三次调查期间阔叶林碳储量逐渐增加, 主要原因是近年来森林保护工程的开展使阔叶林自然生长健康良好。

关键词　碳储量, 固碳速率, 固碳潜力, 阔叶林, 青藏高原高寒区

引用格式: 王建, 王根绪, 王长庭, 冉飞, 常瑞英 (2016). 青藏高原高寒区阔叶林植被固碳现状、速率和潜力. 植物生态学报, 40, 1–1. doi: 10.17521/cjpe.2015.0152

Carbon storage and potentials of the broad-leaved forest in alpine region of the Qinghai-Xizang Plateau

WANG Jian[1,2], WANG Genxu[1*], WANG Changting[3], RAN Fei[1], and CHANG Rui-Ying[1]

[1]Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; [2] Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; and [3] College of Life Science and Technology, Southwest University for Nationalities, Chengdu 610041, China

Abstract

Aims　Our objective was to explore the vegetation carbon storages and their variations in the broad-leaved forests in the alpine region of the Qinghai-Xizang Plateau that includes Qinghai Province and Xizang Autonomous Region.

Methods　Based on forest resource inventory data and field sampling, this paper studied the carbon storage, its sequestration rate, and the potentials in the broad-leaved forests in the alpine region of the Qinghai-Xizang Plateau.

Important findings　The vegetation carbon storage in the broad-leaved forest accounted for 310.70 Tg in 2011, with the highest value in the broadleaved mixed forest and the lowest in *Populus* spp. forest among the six broad-leaved forests that include *Quercus* spp., *Betula* spp., *Populus*, other hard broad-leaved species, other soft broad-leaved species, and the broadleaved mixed forest. The carbon density of the broad-leaved forest was 89.04 Mg·hm^{-2}, with the highest value in other hard broad-leaved species forest and the lowest in other soft broad-leaved species forest. The carbon storage and carbon density in different layers of the forests followed a sequence of overstory layer > understory layer > litter layer > grass layer > dead wood layer, which all increased with forest age. In addition, the carbon storage of broad-leaved forest increased from 304.26 Tg in 2001 to 310.70 Tg in 2011. The mean annual carbon sequestration and its rate were 0.64 Tg·a^{-1} and 0.19 Mg·hm^{-2}·a^{-1}, respectively. The maximum and minimum of the carbon sequestration rate were respectively found in other soft broad-leaved species forest and other hard broad–leaved species forest, with the highest value in the mature forest and the lowest in the young forest. Moreover, the carbon sequestration potential in the tree layer of broad-leaved

收稿日期Received: 2015-04-28　接受日期Accepted: 2015-11-10
* 通信作者Author for correspondence (E-mail: wanggx@imde.ac.cn)

forest reached 19.09 Mg·hm^{-2} in 2011, with the highest value found in *Quercus* spp. forest and the lowest in *Betula* spp. forest. The carbon storage increased gradually during three inventory periods, indicating that the broad-leaved forest was well protected to maintain a healthy growth by the forest protection project of Qinghai Province and Xizang Autonomous Region.

Key words carbon storage; carbon sequestration rate; carbon sequestration potential; broad-leaved forest; alpine area of Qinghai-Xizang Plateau

Citation: Wang J, Wang GX, Wang CT, Ran F, Chang RY (2016). Carbon storage and potentials of the broad-leaved forest in alpine region of the Qinghai-Xizang Plateau. *Chinese Journal of Plant Ecology,* 40, 1–1. doi: 10.17521/cjpe.2015.0152

森林是陆地碳库的主体, 其储存了陆地地上部分碳库的80%, 地下部分的40% (Malhi *et al*., 1999), 在减缓全球气候变化和全球碳循环中起着不可替代的作用。因此, 明确森林的固碳现状、速率和潜力, 对合理经营和管理森林, 促进森林固碳功能的增加具有重要意义。目前, 针对森林的植被碳储量和碳汇功能进行了大量的研究(Rice *et al*., 2004; Akselsson *et al*., 2005; 杨洪晓等, 2005; 王秀云和孙玉军, 2008; 张玮辛等, 2012; Matsuzaki *et al*., 2013), 但多数研究集中在全球或国家尺度上(Dixon *et al*., 1994; 王效科等, 2001; Li *et al*., 2004; 赵敏和周广胜, 2004), 然而我国幅员辽阔, 植被类型多样, 各地区碳储量估算结果存在较大的差异。因此, 为了准确估算我国森林碳汇状况必须准确估算区域尺度的碳汇现状。有关森林固碳潜力的研究, 目前主要以模型模拟运算为主(Ni, 2002; Seely *et al*., 2002; Zhang & Xu, 2003; Ge *et al*., 2013), 且多考虑未来气候变化条件下森林的固碳潜力(Sperow *et al*., 2003), 而依据森林自身林龄发展将当前森林碳储量与历史最大固碳量之差值作为固碳潜力则很少被人关注(Sleutel *et al*., 2003)。

青藏高原高寒区林区是我国林区的重要组成部分。目前, 由于缺乏调查资料, 有关青藏高原高寒区森林植被碳汇状况缺乏全面系统的研究, 而阔叶林植被碳汇状况研究更加缺乏。第八次森林清查数据表明青藏高原高寒区阔叶林面积和蓄积分别占整个乔木林的39.32%和21.02%, 足见阔叶林植被在青藏高原高寒区森林中的重要性。本文以青藏高原高寒区阔叶林植被为研究对象, 估算其植被层的固碳现状、固碳速率和固碳潜力, 旨在了解青藏高原高寒区阔叶林的碳汇现状及其动态变化特征, 为我国区域尺度的森林碳汇估算研究提供基础数据和科学参考。

1 研究区域和研究方法

1.1 研究区概况

青藏高原面积2.57 × 10^6 km^2, 约占中国陆地面积的四分之一。地势上总体呈现由西北向东南倾斜的特征。气候总体上具有西北部严寒干燥, 东南部温暖湿润的特点。近20年来, 青藏高原年平均气温–1.29 ºC, 年降水量396 mm (黄玫等, 2008)。青藏高原高寒区是我国的重要林业基地, 森林面积为1.87 × 10^7 hm^2(其中乔木林面积达8.65 × 10^6 hm^2), 森林覆盖率达9.63% (图1), 森林蓄积量为2.26 × 10^9 m^3(其中乔木林蓄积量达4.07 × 10^8 m^3), 其中, 阔叶林面积为3.4 × 10^6 hm^2, 占乔木林的39.32%, 蓄积量为8.56 × 10^7 m^3, 占乔木林的21.02%。从树种组成看, 阔叶林中不同树种(组)面积比例由大到小依次为: 阔叶混交林(broad-leaved mixed forest, 59.57%)、栎(*Quercus* spp., 14.76%)类、其他硬阔(other hard broad-leaved species, 6.18%)、桦木(*Betula* spp., 4.19%)、其他软阔(other soft broad-leaved species, 3.61%)和杨树(*Populus* spp., 2.32%) (数据来源于青海和西藏两省区森林清查资料)。

本文获得的森林资源清查数据包括: 青海省区1998年、2003和2008年森林资源清查资料, 西藏自治区2006和2011年森林资源清查结果, 其中2001年西藏自治区森林面积和蓄积资料是根据2001–2006年乔木林生长量和消耗量推算得出。由于两省区森林资源清查时间上略有差异, 以西藏自治区三次森林清查时间为准(即2001年、2006年和2011年)进行估算。

1.2 样地设置及取样

2010年, 在青海和西藏两省区按照典型选样的方法, 分别在栎林、桦木林、杨树林、其他硬阔林、其他软阔林和阔叶混交林6个林分类型中设置50 m × 20 m (部分样地因地形和分布面积限制, 大小设

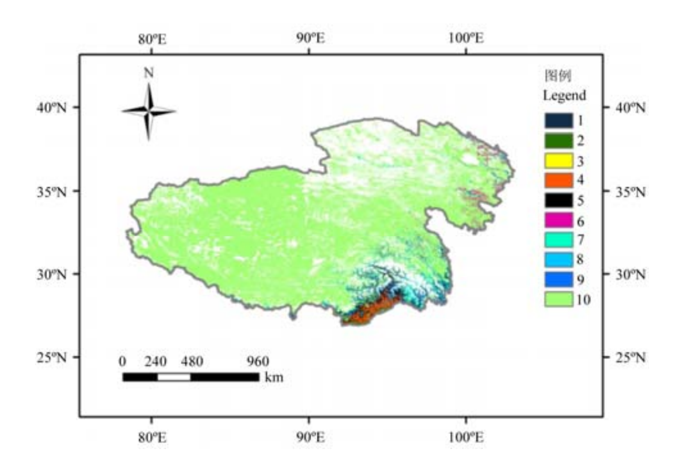


图1　青藏高原高寒区植被分布图。1, 常绿针叶林; 2, 常绿阔叶林; 3, 落叶针叶林; 4, 落叶阔叶林; 5, 混交林; 6, 郁闭灌丛; 7, 开放灌丛; 8, 稀树草原; 9, 热带稀树草原; 10, 草地。土地利用数据(1:100万)来自中国西部环境与生态科学数据中心(http://westdc.westgis.ac.cn)。

Fig. 1　Vegetation map in alpine area of Qinghai-Xizang Plateau. 1, evergreen needleleaf forest; 2, evergreen broadleaf forest; 3, deciduous needleleaf forest; 4, deciduous broadleaf forest; 5, mixed forest; 6, closed shrublands; 7, open shrublands; 8, woody savannas; 9, savannas; 10, grasslands. The landuse data (1:1 000 000) was from the Environmental and Ecological Science Data Center for the West China (http://westdc.westgis.ac.cn).

置为30 m × 20 m)的标准样地37个, 其中, 栎类6个, 桦木15个, 杨树9个, 其他软阔5个, 其他硬阔1个, 阔叶混交林1个。对样地内所有胸径大于5 cm的乔木进行每木检尺, 测定胸径和树高。在每个乔木样方中设置3个5 m × 5 m 灌木样方, 在每个灌木样方中设置1个1 m × 1 m草本样方, 共设置灌木样方和草本样方各111个。在各乔木样方中设置3个1 m × 1 m的凋落物样方, 共计111个。最后分别采集乔木层、灌木层、草本层、枯落物层和枯死木层各部分器官约200 g样品带回实验室, 用于分析含水率和有机碳含量。有机碳含量采用重铬酸钾-硫酸氧化法进行测定(黄从德等, 2008)。阔叶林不同龄级的划分标准详见表2 (中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2011)。

1.3　研究方法

1.3.1　固碳现状计算

(1) 碳密度的计算

乔木层碳储量测定　根据森林固碳课题办公室提供的各主要树种的异速生长方程(表1), 求算各样方内所有乔木的生物量, 乘以相应器官含碳量累加得到样方内乔木层碳储量 ($Mg \cdot hm^{-2}$) (林虹等, 2014; 王宁, 2014)。

林下植被碳储量测定　采用全收获法收集各灌木、草本小样方内所有样品称其总鲜质量, 并取部分样品带回实验室烘干测算含水率, 根据含水率将各小样方灌木、草本鲜质量换算至其干质量并乘以对应器官含碳量求得样方林下灌草碳储量($Mg \cdot hm^{-2}$)。

凋落物和枯死木碳储量测定　将样方内全部枯落物烘干推算其生物量, 根据枯落物的碳含量计算凋落物的碳储量($Mg \cdot hm^{-2}$)。枯死木则按形态(枯立木、枯倒木)和腐烂等级(轻度、中度和重度)进行分类, 分别计算枯立木和枯倒木的体积, 并根据不同腐烂等级的密度计算枯死木的干重, 结合相应腐烂等级样本的碳含量得到枯死木的碳储量($Mg \cdot hm^{-2}$)。

植被碳储量测定　将上述各层碳密度累加得到某阔叶林植被碳密度($Mg \cdot hm^{-2}$)。

(2)固碳现状的估算

结合森林清查资料和以往研究(罗天祥, 1996; 蔡丽莎, 2009; 葛立雯等, 2013)得到的6类阔叶林不同龄级的碳密度和面积, 估算研究区2011年阔叶林植被碳储量(C_F, Tg)。

$$C_F = \sum_{i=1}^{i}\sum_{j=1}^{j}(C_{F_{j,i}} \times A_{F_{j,i}})/1000000$$

式中, $C_{Fj,i}$为第i种阔叶林类型第j个林龄的森林生态系统单位面积碳储量($Mg \cdot hm^{-2}$); $A_{Fj,i}$为第i种阔叶林类型第j个林龄的分布面积(hm^2)。

1.3.2　固碳速率的估算

基于三次森林清查资料和样地调查资料估算的碳储量结果, 通过不同时期阔叶林植被碳储量变化量来估算固碳速率(ΔC_F , $Mg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)。

$$\Delta C_F = \frac{(C_{F_{t_2}} - C_{F_{t_1}})}{(t_2 - t_1)}$$

式中: C_{Ft1}、C_{Ft2}分别为t_1、t_2时间的碳储量($Mg \cdot hm^{-2}$)。

1.3.3　固碳潜力的估算

固碳潜力可以用理论最大固碳潜力和相对固碳潜力($Mg \cdot hm^{-2}$)来表示。本研究估算的固碳潜力为阔叶林理论最大固碳潜力, 根据森林演替理论选择演替顶级自然林作为该类自然林生态系统理论最大固碳潜力的参照系来估算固碳潜力(Sleutel *et al*., 2003)。

doi: 10.17521/cjpe.2015.0152

表1 青藏高原高寒区阔叶林各优势树种生物量异速生长方程
Table 1 The allometric biomass equations of dominant species in the broad-leaved forests in the alpine region of the Qinghai-Xizang Plateau

树种 Forest type	西藏自治区生物量方程 Allometric equations in Tibet Province	树种 Forest type	青海省区生物量方程 Allometric equations in Qinghai Province
栎类 *Quercus* spp.	$W_L = 0.3402(D^2H)^{0.4670}$	山杨 *Populus davidiana*	$W_L = 0.0033(D^2H)^{0.8820}$
	$W_B = 0.03427(D^2H)^{0.8887}$		$W_B = 0.0093(D^2H)^{0.8950}$
	$W_S = 0.1202(D^2H)^{0.9773}$		$W_S = 0.0413(D^2H)^{0.8663}$
	$W_R = 0.8062(D^2H)^{0.7025}$		$W_R = 0.0183(D^2H)^{0.8527}$
杨树 *Populus* spp.	$W_L = 0.0078(D^2H)^{0.7753}$	其他杨树 *Populus* spp.	$W_L = 0.0035(D^2H)^{0.8774}$
	$W_B = 0.026(D^2H)^{0.7655}$		$W_B = 0.0095(D^2H)^{0.8951}$
	$W_S = 0.0529(D^2H)^{0.8364}$		$W_S = 0.0417(D^2H)^{0.8860}$
	$W_R = 0.0079(D^2H)^{0.9577}$		$W_R = 0.0289(D^2H)^{0.7860}$
其他树种 Other species	$W_L = 0.0075(D^2H)^{0.8592}$	其他树种 Other species	$W_L = 0.0075(D^2H)^{0.8592}$
	$W_B = 0.0079(D^2H)^{1.007}$		$W_B = 0.0079(D^2H)^{1.007}$
	$W_S = 0.0401(D^2H)^{0.8514}$		$W_S = 0.0401(D^2H)^{0.8514}$
	$W_R = 0.0176(D^2H)^{0.8841}$		$W_R = 0.0176(D^2H)^{0.8841}$

D, 单株乔木胸径(cm); *H*, 单株乔木高度(m), W_L, 乔木叶生物量 (kg); W_L, 乔木枝生物量(kg); W_L, 乔木干生物量(kg); W_L, 乔木根生物量(kg)。
D, tree diameter (cm); *H*, tree height (m); W_L, tree leaf biomass (kg); W_B, tree branch biomass (kg); W_S, tree stem biomass (kg); W_R, tree root biomass (kg).

表2 青藏高原高寒区阔叶林不同林型龄级与龄组划分表
Table 2 The partition table of age classes for different broad-leaved forests in the alpine region of the Qinghai-Xizang Plateau

林型 Forest type	幼龄林 Young forest	中龄林 Middle- aged forest	近熟林 Near-mature forest	成熟林 Mature Forest	过熟林 Over-mature forest
栎类 *Quercus* spp.	≤40	41–60	61–80	81–120	≥121
桦木 *Betula* spp.	≤30	31–50	51–60	61–80	≥81
杨树 *Populus* spp.	≤10	11–15	16–20	21–30	≥31
其他软阔 Other soft broad–leaved species	≤10	11–15	16–20	21–30	≥31
其他硬阔 Other hard broad–leaved species	≤40	41–60	61–80	81–120	≥121
阔叶混交林 Broad–leaved mixed forest	≤40	41–60	61–80	81–120	≥121

阔叶林固碳潜力=演替顶级阔叶林碳密度-阔叶林平均碳密度

2 结果与分析

2.1 青藏高原高寒区阔叶林植被固碳现状

2.1.1 不同林型固碳现状

青藏高原高寒区阔叶林植被平均碳密度为89.04 Mg·hm^{-2}, 植被各层碳密度大小顺序为: 乔木层(83.04 Mg·hm^{-2})＞灌木层(4.40 Mg·hm^{-2})>凋落物层(1.13 Mg·hm^{-2})＞草本层(0.40 Mg·hm^{-2})>枯死木层(0.07 Mg·hm^{-2})。不同阔叶林类型乔木层、灌木层、草本层、凋落物层和枯死木层碳密度分别在63.47–92.80、1.57–15.76、0.13–1.81、0.28–3.76和0–1.55 Mg·hm^{-2}之间, 植被碳密度在68.74–102.86 Mg·hm^{-2}之间(图2A)。乔木层中碳密度最大和最小林型分别是阔叶混交林和桦木, 灌木层中碳密度最大和最小林型分别是栎类和阔叶混交林; 草本层碳密度为桦木最大, 其他软阔最小; 凋落物层碳密度为其他硬阔最大, 阔叶混交林最小; 除桦木和杨树外, 其余林型均没有发现枯死木。而植被碳密度为其他硬阔最大, 其他软阔最小。

青藏高原高寒区阔叶林植被碳储量为310.70 Tg, 其中乔木层、灌木层、草本层、凋落物层和枯死木层分别占植被碳储量的93.27%、4.94%、0.45%、1.27%和0.08%, 各层碳储量大小排序为: 乔木层(289.77 Tg)＞灌木层(15.35 Tg)＞凋落物层(3.93 Tg)＞草本层(1.39 Tg)>枯死木层(0.26 Tg)。不同森林类型乔木层、灌木层、草本层、凋落物层和枯死木层碳储量分别在5.93–207.57、0.35–8.73、0.02–0.47、0.05–1.96和0–0.24 Tg之间, 植被碳储量在6.35–212.17 Tg之间(图2B)。阔叶混交林碳储量最大, 其次是栎类, 其碳储量分别占阔叶林碳储量的68.29%和15.26%。

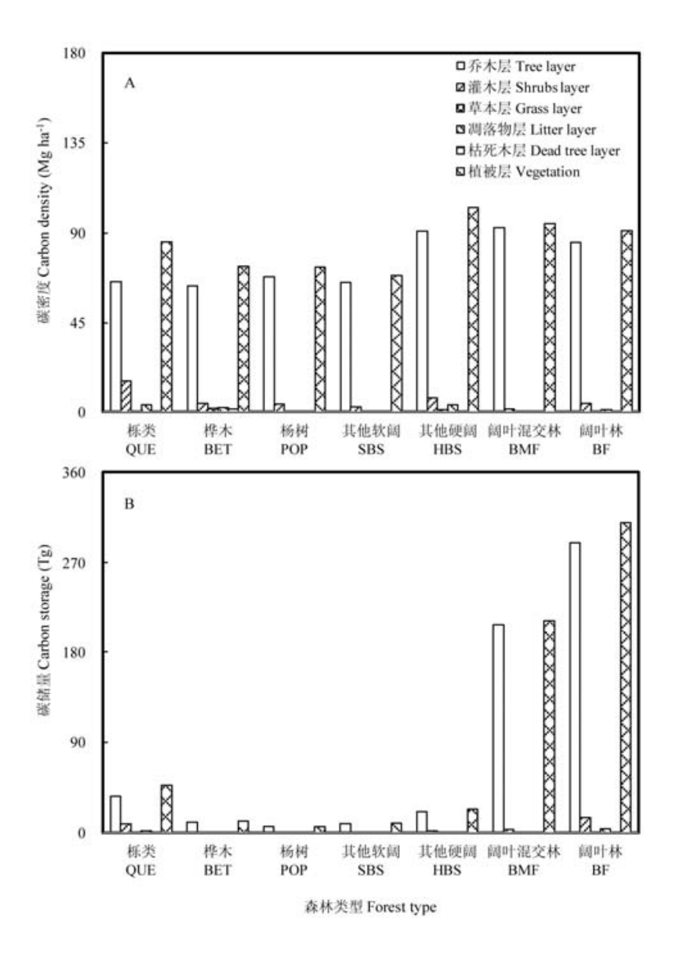


图2　青藏高原高寒区阔叶林乔木层、灌木层、草本层、凋落物层、枯死木层和植被碳储量和碳密度

Fig. 2　Carbon storage and density of overstory, understory, grass, litter, dead woody layers in the broad-leaved forests in the alpine region of the Qinghai-Xizang Plateau. QUE, BUE, POP, SBS, HBS,BMF, BF refer to *Quercus* spp., *Betula* spp., *Populus* spp., Other soft broad-leaved species, Other hard broad-leaved species, Broad-leaved mixed forest, Broad-leaved forest, respectively.

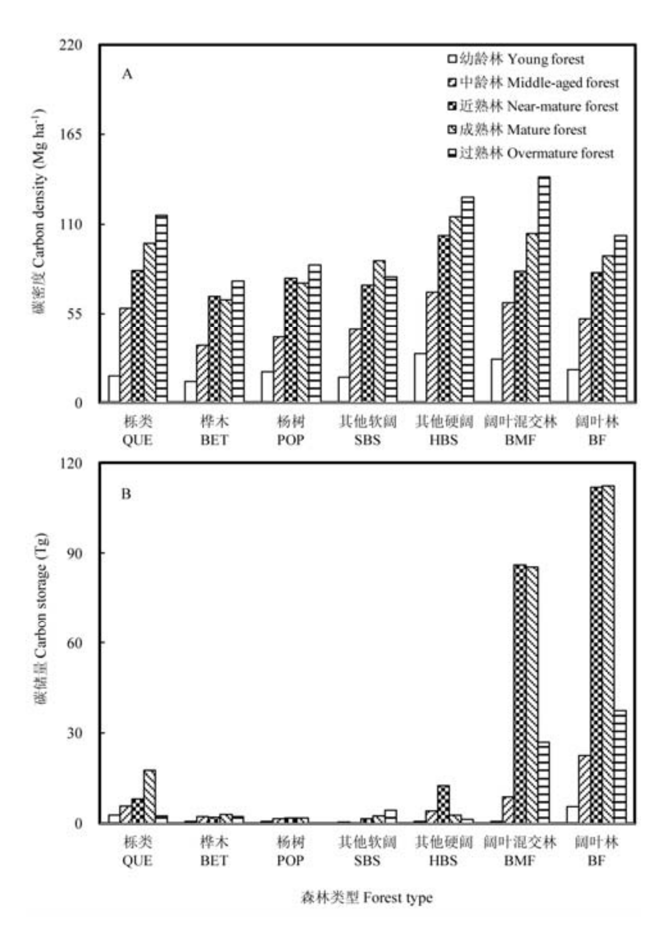


图3　青藏高原高寒区阔叶林不同龄级乔木层碳储量和碳密度

Fig. 3　Carbon storage and density of overstory tree layer for different age classes in the broad-leaved forests in the alpine region of the Qinghai-Xizang Plateau.

2.1.2　不同龄级乔木层固碳现状

青藏高原高寒区阔叶林植被主要为近熟林和成熟林，碳储量表现为成熟林最大，占阔叶林乔木层碳储量的38.85%，近熟林略低于成熟林，占38.68%(图3-B)。幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林和过熟林的碳密度分别介于13.28–30.25、35.65–68.21、65.60–102.82、63.55–114.64和74.97–138.74 Mg·hm^{-2}之间(图3A)。各龄组中过熟林碳密度最大林型为阔叶混交林，其余龄组碳密度最大的林型均为其他硬阔，碳密度最小的林型均为桦木。林龄组成对乔木层碳密度影响较大，阔叶林六类林型碳密度多数表现为幼龄林最小，且随林龄增加碳密度有增大的趋势(图3A)。

2.2　青藏高原高寒区阔叶林植被固碳速率

2.1.1　不同林型固碳速率

三次森林资源连续清查阔叶林植被碳储量分别为304.26 Tg, 306.44 Tg, 310.70 Tg，平均每年固碳量为0.64 Tg·a^{-1}, 5年期间隔固碳速率分别为0.13、0.25 Mg·hm^{-2}·a^{-1}，平均0.19 Mg·hm^{-2}·a^{-1}(表3)。2011年阔叶林各林型植被碳储量大小分别为阔叶混交林(212.17 Tg)>栎类(47.42 Tg)>其他硬阔(23.86 Tg)>桦木(11.56 Tg)>其他软阔(9.33 Tg)>杨树(6.35 Tg)，阔叶混交林历次调查碳储量最高，分别占三次调查阔叶林碳储量的69.68%、69.16%和68.29%，但其10年年均固碳量(0.02 Tg·a^{-1})和固碳速率(0.01 Mg·hm^{-2}·a^{-1})在不同林型中较小。其次是栎类，分别占三次调查阔叶林总碳储量的14.68%、14.87%和15.26%，其10年年均固碳量(0.28 Tg·a^{-1})在不同林分中最大。杨树林历次调查碳储量最低，占三次调

表3 青藏高原高寒区阔叶林不同林分碳储量和固碳速率
Table 3 The carbon storage and its rate of different broad-leaved forests in the alpine region of the Qinghai-Xizang Plateau

林型 Forest type	固碳速率 ($Mg·hm^{-2}·a^{-1}$) Carbon sequestration rate ($Mg·hm^{-2}·a^{-1}$)			碳储量 (Tg) Carbon storage (Tg)			10年年均固碳量 Mean annual carbon sequestration ($Tg·a^{-1}$)
	2001–2006	2006–2011	2001–2011	2001	2006	2011	
栎类 *Quercus* spp.	0.36	0.74	0.55	44.66	45.56	47.42	0.28
桦木 *Betula* spp.	1.04	0.71	0.88	10.00	10.92	11.56	0.16
杨树 *Populus* spp.	0.92	0.57	0.74	5.46	6.01	6.35	0.09
其他软阔 Other soft broad-leaved species	–0.24	2.65	1.21	8.14	8.03	9.33	0.12
其他硬阔 Other hard broad-leaved species	0.01	–0.12	–0.06	23.99	24.00	23.86	–0.01
阔叶混交林 Broad-leaved mixed forest	–0.01	0.02	0.01	212.00	211.92	212.17	0.02
阔叶林 Broad-leaved forest	0.13	0.25	0.19	304.26	306.44	310.70	0.64

表4 青藏高原高寒区阔叶林不同龄级碳储量和固碳速率
Table 4 The carbon storage and its rate for different age classes of the broad-leaved forests in the alpine region of the Qinghai-Xizang Plateau

龄级 Age group	固碳速率 ($Mg·hm^{-2}·a^{-1}$) Carbon sequestration rate ($Mg·hm^{-2}·a^{-1}$)			碳储量 (Tg) Carbon storage (Tg)			10年年均固碳量 Mean annual carbon sequestration ($Tg·a^{-1}$)
	2001–2006	2006–2011	2001–2011	2001	2006	2011	
幼龄林 Young forest	0.14	0.47	0.30	3.92	4.26	5.44	0.15
中龄林 Middle-aged forest	0.82	0.47	0.65	21.16	21.89	22.31	0.12
近熟林 Near-mature forest	0.05	0.88	0.47	111.65	111.68	112.10	0.04
成熟林 Mature Forest	0.47	1.43	0.95	111.57	111.83	112.59	0.10
过熟林 Over-mature forest	0.26	0.71	0.49	36.22	36.52	37.34	0.11
阔叶林 Broad-leaved forest	0.15	0.32	0.24	284.53	286.18	289.77	0.52

查阔叶林碳储量的1.80%、1.96%和2.04%, 其10年年均固碳量和固碳速率分别为0.09 $Tg·a^{-1}$和0.74 $Mg·hm^{-2}·a^{-1}$。10年间除其他硬阔固碳量为负增长外, 其余林型均呈正增长。

2.1.2 不同龄级乔木层固碳速率

三次森林资源连续清查阔叶林乔木层碳储量分别为284.53 Tg, 286.18 Tg, 289.77 Tg, 年均固碳量为0.52 $Tg·a^{-1}$, 5年期间隔固碳速率分别为0.15、0.32 $Mg·hm^{-2}·a^{-1}$, 平均0.24 $Mg·hm^{-2}·a^{-1}$(表4)。除2001年近熟林碳储量略高于成熟林外, 各龄组乔木层碳储量分别为成熟林>近熟林>过熟林>中龄林>幼龄林, 历次调查近熟林和成熟林固碳量最大, 其总和均占乔木层固碳量的75%以上。此外, 阔叶林各龄组乔木层碳储量随时间表现为逐渐增加趋势。其中, 成熟林固碳速率最大, 10年期间隔为0.95 $Mg·hm^{-2}·a^{-1}$, 年均固碳量0.10 $Tg·a^{-1}$; 幼龄林固碳速率最小, 10年期间隔为0.3 $Mg·hm^{-2}·a^{-1}$, 年均固碳量0.15 $Tg·a^{-1}$。各林龄组固碳速率均表现为正, 主要是因为近年森林保护工程的开展使阔叶林生长健康和自然演替更新良好。

2.3 青藏高原阔叶林植被乔木层固碳潜力

2011年阔叶林乔木层固碳潜力为19.09 $Mg·hm^{-2}$。各林分乔木层固碳潜力分别为栎类(49.88 $Mg·hm^{-2}$)>阔叶混交林(45.94 $Mg·hm^{-2}$)>杨树(37.74 $Mg·hm^{-2}$)>其他硬阔(35.20 $Mg·hm^{-2}$)>其他软阔(30.87 $Mg·hm^{-2}$)>桦木(12.27 $Mg·hm^{-2}$) (图4)。

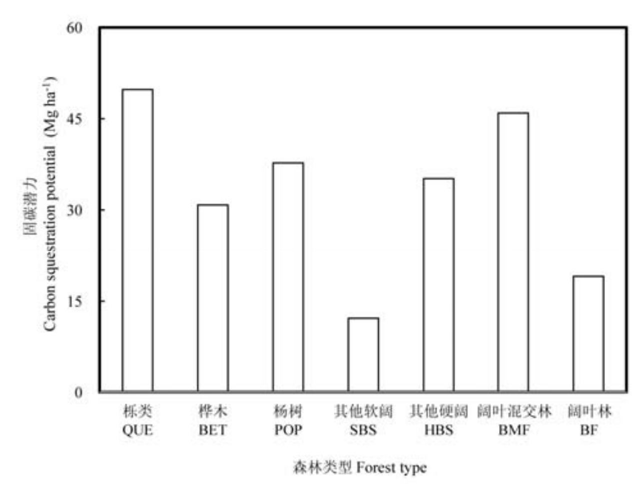


图4 青藏高原高寒区阔叶林不同林型固碳潜力
Fig. 4 The carbon sequestration potential of different broad-leaved forests in alpine region of the Qinghai-Xizang Plateau.

3 讨论

3.1 青藏高原阔叶林在全国森林碳汇中的地位

森林作为陆地生态系统的主体, 其碳储量在稳定全球气候变化、减缓温室效应等方面发挥着重要的作用。Piao等估测我国阔叶林和森林植被碳储量分别为2.46–2.62 Pg和5.62–5.99 Pg (Piao *et al*., 2005), Guo等估测分别为2.93–3.57 Pg和5.86–7.73 Pg (Guo *et al*., 2010), Fang等估测分别为1.91–4.54 Pg和3.78–6.86 Pg(Fang & Wang, 2001)。本研究估测青藏高原高寒区阔叶林植被碳储量为310.70 Tg, 占全国阔叶林植被碳储量的6.84–16.27%, 占全国森林植被碳储量的4.53–8.22%。本研究中阔叶林植被碳密度为89.04 Mg·hm^{-2}, 高于全国阔叶林平均碳密度水平40.18 Mg·hm^{-2}(中华人民共和国建设部, 1993), 而与青藏高原高寒区处于同一林区的四川省和云南省阔叶林碳密度分别为30.35 Mg·hm^{-2}(唐霄, 2007)和66.50 Mg·hm^{-2}(李亮, 2012), 我国东北林区的吉林省和东南林区的广东省同期内阔叶林碳密度分别为49.55 Mg·hm^{-2}(王新闯等., 2011)和21.56 Mg·hm^{-2}(叶金盛和佘光辉, 2010), 均小于青藏高原高寒区阔叶林碳密度。这主要是由于青藏高原高寒区阔叶林中碳密度较大的近熟林和成熟林所占比重过大所致(面积共占阔叶林的70.85%)。一方面, 较大的碳密度使阔叶林具有相当可观的碳库, 另一方面, 近熟林和成熟林比重过大的阔叶林龄级结构使研究区阔叶林的固碳速率可能偏低。近十年青藏高原高寒区阔叶林固碳速率为0.19 Mg·hm^{-2}·a^{-1}, 低于同位于西南林区的四川省(包括重庆市)阔叶林固碳速率(1993–2003年, 0.29 Mg·hm^{-2}·a^{-1})(黄从德等., 2008), 但仍高于东南林区的广东省阔叶林固碳速率(1997–2007年, 0.091 Mg·hm^{-2}·a^{-1})(叶金盛和佘光辉, 2010)。此外, 近十年阔叶林固碳潜力为19.09 Mg·hm^{-2}, 略高于东北林区的吉林省阔叶林固碳潜力(17.63 Mg·hm^{-2})(王新闯等., 2011), 略低于同位于西南林区的四川省阔叶林固碳潜力(19.39 Mg·hm^{-2})(黄从德, 2008)。可见, 青藏高原高寒区阔叶林在全国森林中具有较强的碳汇功能, 在全国森林碳储量中扮演着重要的角色。

3.2 阔叶林植被碳储量、速率和潜力的影响因素

林龄对阔叶林碳密度、碳储量、固碳速率和固碳潜力的影响很大。任治忠对我国西南桦固碳量与林龄关系的研究发现, 西南桦乔木林碳密度与林龄间呈二次抛物线模型关系(任治忠, 2013)。甄伟等研究发现辽宁省栎类在林龄约为80年时达到成熟, 成熟以后其蓄积量变化不大, 碳储量也逐渐趋于稳定(甄伟等., 2014)。在研究吉林省森林植被碳储量现状时, 五类阔叶林乔木层碳密度多数表现为过熟林最大, 幼龄林最小(王新闯等., 2011)。林龄通过影响碳密度进一步影响阔叶林碳储量、固碳速率及其固碳潜力。本研究中, 林龄组成对乔木层碳密度影响很大, 阔叶林六类林型碳密度多数表现为幼龄林最小, 且随林龄增加碳密度有增大的趋势, 但由于各龄级面积差异较大, 碳储量最大龄级集中在近熟林和成熟林; 固碳速率则表现为成熟林最大, 幼龄林最小。

地形、坡度和海拔等环境因子是阔叶林固碳的重要影响因素。环境因子不同, 其所处水分、养分、光照和土壤条件不同, 阔叶林碳密度、碳储量、固碳速率及潜力也存在很大差异。在研究大兴安岭森林生物量影响因素时, 落叶阔叶混交林碳密度表现为随海拔升高先增大后减小且阳坡大于阴坡的特征(王晓莉等., 2014); 王媛认为坡度越大, 碳密度越大(王媛, 2014)。本研究中由于受调查样点数的限制, 未能考虑坡向、坡度和海拔等环境因子对阔叶林固碳的影响, 但就全区调查的阔叶林而言, 以高山栎为例, 植被碳密度总体表现出随海拔升高而减小、随坡度增加而增大, 阳坡大于阴坡的特征。

此外, 森林砍伐或培育引起的阔叶林面积减少或增加也是影响区域阔叶林植被碳储量变化的重要原因。从研究区的固碳速率来看, 个别林型也表现出因砍伐引起面积减少而导致其植被碳储量减少的结果(表3)。比如其他软阔林在2001–2006年间砍伐严重, 其固碳速率为–0.24 Mg·hm^{-2}·a^{-1}; 其他硬阔林在2006–2011年间砍伐严重, 固碳速率为–0.12 Mg·hm^{-2}·a^{-1}。虽然个别林型存在砍伐现象, 但总体上阔叶林植被碳储量表现出逐年增加的趋势, 分析原因除了阔叶林自身生长状况良好外, 还与近年来林业保护工程对研究区中幼龄林栽种培育息息相关。因此, 减少滥砍滥伐, 大量栽种和培育中幼龄林, 增加阔叶林面积, 有利于提升研究区阔叶林资源在全国碳汇中的作用。

3.3 估算结果不确定性

不同学者所采用的估算方法不同, 因此对森林植被碳储量的估算结果差异较大。就国家尺度而言,

doi: 10.17521/cjpe.2015.0152

Pan等利用改进的生物量-蓄积量方法估算了20年来(1973–1993年)中国森林碳储量和固碳速率(Pan *et al*., 2004), 结果碳储量低于方精云等的估算结果, 而固碳速率则高于方精云等估算结果(Fang &Wang, 2001)。王效科等基于561个样地资料估算了中国森林碳储量(王效科等., 2001), 估算结果与Pan等较为一致(Pan *et al*., 2004)。就区域尺度而言, 黄从德利用四川省各县森林清查资料估算了四川省森林植被生物量(黄从德, 2008), 结果比唐宵的估算结果低12.97%(唐宵, 2007), 而与赵敏等估算结果基本一致(赵敏和周广胜, 2004)。若基于桂来庭和卢航等的估算结果, 青藏高原高寒区森林植被碳储量为914.2 Tg(桂来庭, 2013; 卢航等., 2013), 远高于王效科等的估算结果(246.08 Tg)(王效科等., 2001), 而与吴庆标等的估算结果基本一致(904.33–987.93 Tg)(吴庆标等., 2008)。本研究没有估算青藏高原高寒区全部植被碳储量, 而仅对阔叶林植被碳储量进行了估算, 其值在2011年达310.70 Tg, 如以桂来庭和吴庆标等的研究结果为基础, 青藏高原高寒区阔叶林植被碳储量占整个森林的31.45–34.36%, 与青藏高原高寒区阔叶林蓄积量比例(21.02%)相比, 阔叶林碳储量比例偏高。分析原因可能由于桂来庭和卢航等在估算植被碳储量时均没有充分考虑林下植被碳储量(包括灌草层、凋落物和枯死木层), 而吴庆标等在估算植被碳储量时所采用的林木密度(全国平均密度)可能低于青藏高原高寒区植被碳密度, 使其对青藏高原高寒区森林植被碳储量估算偏低。张万林等和付达夫分别估算了西藏自治区凋落物和灌木碳储量, 其值高达204 Tg和73 Tg(张万林等., 2013; 付达夫, 2014)。从以上分析可以看出, 以往结果并未全面考虑整个植被层, 导致青藏高原高寒区森林碳储量的估算结果偏低。因此, 在估算区域碳储量时, 不仅森林生物量模型对森林植被碳储量估算结果影响很大, 而且估算参数精确性和估算对象完整性同样对估算结果影响很大。

此外, 龄级随时间的推演引起的碳密度变化也增加了阔叶林固碳速率估算的不确定性。三次森林资源清查间隔为10年, 期间会引起阔叶林部分林型从低龄级推演到高龄级, 碳密度、碳储量和固碳速率也会随之发生相应的变化。然而, 10年的时间仅能判定杨树和软阔类更新了一个或两个龄级, 无法准确判定阔叶林其余林型龄级更新状况(表2), 因此无法用定量的方法来估算龄级推演引起的碳密度和固碳速率的变化。考虑到研究区杨树和其他软阔碳储量之和仅占阔叶林碳储量的6.2%, 其龄级更新引起的碳密度变化对阔叶林固碳速率的影响不大, 本研究在估算固碳速率时, 没有考虑10年前后龄级更新引起的碳密度变化。但对于优势树种为杨树和其他软阔的省区, 或者针对超过40年的长期的固碳速率的估算, 龄级的更新引起的固碳速率的变化就不能被忽略。因此, 如何准确定量龄级推演引起的固碳速率的变化对于准确估算森林固碳速率有着重要的意义。

4 结论

本研究根据森林连续清查资料和样地实测数据估算了青藏高原高寒区阔叶林植被的碳密度、碳储量、固碳速率和固碳潜力。研究结果表明, 阔叶林植被碳储量和碳密度分别为310.70 Tg和89.04 Mg·hm^{-2}, 高于全国多数省区阔叶林碳储量和碳密度, 其中以阔叶混交林碳储量最大, 其他硬阔林碳密度最大。近年来森林保护工程广泛开展, 10年间阔叶林植被碳储量逐渐增加, 其中以其他软阔林和成熟林增幅最大。研究区阔叶林中幼龄林比重偏小, 其固碳速率和乔木层固碳潜力偏小。因此, 要提升研究区阔叶林资源在全球碳平衡和碳循环中的作用以及在区域生态建设中的作用, 一方面应加强森林监管力度, 杜绝对阔叶林的滥砍滥伐, 使其健康良好生长, 增加森林碳汇潜力, 另一方面, 以保护和培育中幼龄林为中心, 通过科学抚育提高中幼龄林的碳汇能力。

基金项目 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050207)和中国科学院重点部署项目-创新团队国际合作伙伴计划(KZZD-EW-TZ-06)。

致谢 感谢青海省和西藏自治区林业厅和各市林业部门在野外采样调查工作中的支持和配合。

参考文献

Akselsson C, Berg B, Meentemeyer V, Westling O (2005). Carbon sequestration rates in organic layers of boreal and temperate forest soils—Sweden as a case study. *Global Ecology and Biogeography,* 14, 77–84.

Cai LS (2009). *Study on Carbon Storage of Forest Vegetation and Its Changes in Yunnan Province.* Master degree dissertation, Southwest Forestry University, Kunming. 28–29. (in Chinese) [蔡丽莎 (2009). 云南省森林植被碳储量及

动态变化研究. 硕士学位论文, 西南林学院, 昆明. 4–7.](请核对页码, 中英不一致)

Dixon RK, Solomon AM, Brown S, Houghton RA, Trexier MC, Wisniewski J (1994). Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science,* 263, 185–190.

Fang JY, Wang ZM (2001). Forest biomass estimation at regional and global levels, with special reference to China's forest biomass. *Ecological Research,* 16, 587–592.

Fu DF (2014). Shrubwood carbon reserve estimation in Tibet Autonomous Region. *Central South Forest Inventory and Planning,* 33(4), 4–7. (in Chinese) [付达夫 (2014). 西藏自治区灌木林碳储量估算. 中南林业调查规划, 33(4), 4–7.]

Ge LW, Pan G, Ren DZ, Du YJ, Zheng XL (2013). Forest carbon storage, carbon density, and their distribution characteristics in Linzhi area of Tibet, China. *Chinese Journal of Applied Ecology,* 24, 319–325. (in Chinese) [葛立雯, 潘刚, 任德智, 杜玉婕, 郑祥蕾 (2013). 西藏林芝地区森林碳储量、碳密度及其分布. 应用生态学报, 24, 319–325.]

Ge ZM, Kellomäki S, Peltola H, Zhou X, Väisänen H, Strandman H (2013). Impacts of climate change on primary production and carbon sequestration of boreal Norway spruce forests: Finland as a model. *Climatic Change,* 118, 259–273.

General Administration of Quality Supervision, Inspection, Quarantine of the People's Republic of China and Standardization Administration of the People's Republic of China (2011). GB/T 26424-2010 *Technical regulations for inventory for forest management planning and design*. China Standard Publishing House, Beijing. 8. (in Chinese) [中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会 (2011). GB/T 26424-2010 森林资源规划设计调查技术规程. 中国标准出版社, 北京. 8.]

Gui LT (2013). The status and countermeasures of Tibet forest carbon pool. *Central South Forest Inventory and Planning,* 32(3), 1–4. (in Chinese) [桂来庭 (2013). 西藏自治区森林碳库状况及对策. 中南林业调查规划, 32(3), 1–4.]

Guo ZD, Fang JY, Pan YD, Birdsey R (2010). Inventory-based estimates of forest biomass carbon stocks in China: A comparison of three methods. *Forest Ecology and Management,* 259, 1225–1231.

Huang CD (2008). *Characteristics of Carbon Stock and Its Spatial Differentiation in the Forest Ecosystem of Sichuan*. PhD dissertation, The Graduate School of Sichuan Agricultural University, Yaan. 90–91. (in Chinese) [黄从德 (2008). 四川森林生态系统碳储量及其空间分异特征. 博士学位论文, 四川农业大学, 雅安. 90–91.]

Huang CD, Zhang J, Yang WQ, Tang X, Zhao AJ (2008). Dynamics on forest carbon stock in Sichuan province and Chongqing city. *Acta Ecologica Sinica,* 28, 966–975. (in Chinese) [黄从德, 张健, 杨万勤, 唐宵, 赵安玖 (2008). 四川省及重庆地区森林植被碳储量动态. 生态学报, 28, 966–975.]

Huang M, Ji JJ, Peng LL (2008). The response of vegetation net primary productivity to climate change during 1981-2000 in the Tibetan Plateau. *Climatic and Environmental Research,* 13, 608–616. (in Chinese) [黄玫, 季劲钧, 彭莉莉 (2008). 青藏高原1981~2000年植被净初级生产力对气候变化的响应. 气候与环境研究, 13, 608–616.]

Li KR, Wang SQ, Cao MK (2004). Vegetation and soil carbon storage in China. *Science in China (Series D: Earth Sciences),* 47, 49–57.

Li L (2012). *Change of Carbon Storage in Forest Vegetation and Carbon Sequestration Potential Analysis of Yunnan Province in 1992–2007*. Master degree dissertation, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming. 22–23. (in Chinese) [李亮 (2012). 云南省1992–2007年森林植被碳储量动态变化及其碳汇潜力分析. 硕士学位论文, 云南财经大学, 昆明. 22–23.](未链接到英文信息)

Lin H, Ma X, He ZH, Liu B, Huang Z, Tian XJ (2014). Research on forest ecosystem carbon sinks in Jiangsu provnce. *Forest Resources Management,* (1), 89–97. (in Chinese) [林虹, 马旭, 何再华, 刘斌, 黄众, 田兴军 (2014). 江苏省森林生态系统碳汇现状研究. 林业资源管理, (1), 89–97.]

Lu H, Liu K, Wu JH (2013). Change of carbon storage in forest vegetation and current situation analysis of Qinghai pronvince in reccent 20 years. *Resources and Environment in the Yangtze Basin,* 22, 1333–1338. (in Chinese) [卢航, 刘康, 吴金鸿 (2013). 青海省近20年森林植被碳储量变化及其现状分析. 长江流域资源与环境, 22, 1333–1338.]

Luo TX (1996). *Patterns of Net Primary Productivity for Chinese Major Forest Types and Their Mathematical Models*. PhD dissertation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing. 132–167. (in Chinese) [罗天祥 (1996). 中国主要森林类型生物生产力格局及其数学模型. 博士学位论文, 中国科学院研究生院, 北京. 132–167.]

Malhi Y, Baldocchi DD, Jarvis PG (1999). The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. *Plant, Cell & Environment,* 22, 715–740.

Matsuzaki E, Sanborn P, Fredeen AL, Shaw CH, Hawkins C (2013). Carbon stocks in managed and unmanaged old-growth western redcedar and western hemlock stands of Canada's inland temperate rainforests. *Forest Ecology and Management,* 297, 108–119.

Ministry of Construction of the People's Republic of China (1993). *City Green Regulations Interpretation*. Chinese Legal Press, Beijing. (in Chinese) [中华人民共和国建设

部 (1993). 城市绿化条例释义. 中国法制出版社, 北京.](未链接到英文信息)

Ni J (2002). Effects of climate change on carbon storage in boreal forests of China: A local perspective. *Climatic Change,* 55, 61–75.

Office of Forest Carbon Fixation Project (2014). *Biomass Estimation Equation*. Strategic pilot projects of Chinese Academy of Sciences—The projects about authentication of responses of carbon receipts and expenditure on climate change and related issues—The projects on the status, rate, mechanism and potential of carbon equestration in forest ecosystem in China, 37–51. (in Chinese) [森林固碳课题办公室 (2014). 生物量估算方程. 中国科学院战略先导性专项-应对气候变化的碳收支认证及其相关问题专项-中国森林生态系统固碳现状、速率、机制和潜力课题, 37–51.](未链接到本条文献信息, 请核对)

Pan YD, Luo TX, Birdsey R, Hom J, Melillo J (2004). New estimates of carbon storage and sequestration in China's forests: effects of age–class and method on inventory-based carbon estimation. *Climatic Change,* 67, 211–236.

Piao SL, Fang JY, Zhu B, Tan K (2005). Forest biomass carbon stocks in China over the past 2 decades: Estimation based on integrated inventory and satellite data. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences,* 110, doi: 10.1029/2005JG000014.

Ren ZZ (2013). *Study on the Carbon Sequestration Capacity of the Plantation of Betula Alnoides*. PhD dissertation, Kunming University of Science and Technology, Kunming. 72–73. (in Chinese) [任治忠 (2013). 西南桦人工林碳汇功能研究. 博士学位论文, 昆明理工大学, 昆明. 72–73.]

Rice AH, Pyle EH, Saleska SR, Hutyra L, Palace M, Keller M, de Camargo PB, Portilho K, Marques DF, Wofsy SC (2004). Carbon balance and vegetation dynamics in an old-growth Amazonian forest. *Ecological Applications,* 14, 55–71.

Seely B, Welham C, Kimmins H (2002). Carbon sequestration in a boreal forest ecosystem: Results from the ecosystem simulation model, FORECAST. *Forest Ecology and Management,* 169, 123–135.

Sleutel S, De Neve S, Hofman G, Boeckx P, Beheydt D, Van Cleemput O, Mestdagh I, Lootens P, Carlier L, Van Camp N, Verbeeck H, Vande Walle I, Samson R, Lust N, Lemeur R (2003) Carbon stock changes and carbon sequestration potential of flemish cropland soils. *Global Change Biology,* 9, 1193–1203.

Sleutel S, De Neve S, Hofman G, Boeckx P, Beheydt D, Van Cleemput O, Mestdagh I, Lootens P, Carlier L, Van Camp N, Verbeeck H, Vande Walle I, Samson R, Lust N, Lemeur R (2003). Carbon stock changes and carbon sequestration potential of flemish cropland soils. *Global Change Biology,* 9, 1193–1203. (本条文献与上一条重复)

Sperow M, Eve M, Paustian, K (2003). Potential soil C sequestration on U.S. agricultural soils. *Climatic Change,* 57, 319–339.

Tang X (2007). *Carbon Storage of Forest Vegetation and Spatial Distribution in Sichuan Province*. Master degree dissertation, The Graduate School of Sichuan Agricultural University, Yaan. 18–21. (in Chinese) [唐霄 (2007). 四川森林植被碳储量估算及其空间分布特征. 硕士学位论文, 四川农业大学, 雅安. 18–21.]

Wang N (2014). *Study on Distribution Patterns of Carbon Density and Carbon Stock in the Forest Ecosystem of Shanxi.* PhD dissertation, Beijing Forestry University, Beijing. 118–121. (in Chinese) [王宁 (2014). 山西森林生态系统碳密度分配格局及碳储量研究. 博士学位论文, 北京林业大学, 北京. 118–121.]

Wang XK, Feng ZW, Ou-yang ZY (2001). Vegetation carbon storage and density of forest ecosystems in China. *Chinese Journal of Applied Ecology,* 12, 13–16. (in Chinese) [王效科, 冯宗炜, 欧阳志云 (2001). 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究. 应用生态学报, 12, 13–16.]

Wang XL, Chang Y, Chen HW, Hu YM, Feng YT, Wu W, Jiao LL (2014). Biomass allocation characteristics of the main forest ecosystems in the Great Xing'an Mountains, Heilongjiang province. *Chinese Journal of Ecology,* 33, 1437–1444. (in Chinese) [王晓莉, 常禹, 陈宏伟, 胡远满, 冯玉婷, 吴文, 焦琳琳 (2014). 黑龙江省大兴安岭主要森林生态系统生物量分配特征. 生态学杂志, 33, 1437–1444.]

Wang XL, Chang Y, Chen HW, Hu YM, Jiao LL, Feng YT, Wu W, Wu HF (2014). Spatial pattern of forest biomass and its influencing factors in the Great Xing'an Mountains, Heilongjiang province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology,* 25, 974–982. (in Chinese) [王晓莉, 常禹, 陈宏伟, 胡远满, 焦琳琳, 冯玉婷, 吴文, 伍海峰 (2014). 黑龙江省大兴安岭森林生物量空间格局及其影响因素. 应用生态学报, 25, 974–982.]

Wang XC, Qi G, Yu DP, Zhou L, Dai LM (2011). Carbon storage, density, and distribution in forest ecosystems in Jilin province of Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology,* 22, 2013–2020. (in Chinese) [王新闯, 齐光, 于大炮, 周莉, 代力民 (2011). 吉林省森林生态系统的碳储量、碳密度及其分布. 应用生态学报, 22, 2013–2020.](请调整本条文献顺序)

Wang XY, Sun YJ (2008). Review on research and estimation methods of carbon storage in forest ecosystem. *World Forestry Research,* 21(5), 24–29. (in Chinese) [王秀云, 孙玉军 (2008). 森林生态系统碳储量估测方法及其研究进展. 世界林业研究, 21(5), 24–29.]

Wang Y (2014). *Study on Carbon Storage of Forest Vegetation*

and Its Affecting Factors in the Region South of Miaodao Archipelago. Master degree dissertation, Tianjin University of Technology, Tianjin. 34–36. (in Chinese) [王媛 (2014). 庙岛群岛南部岛群森林植被碳储量及其影响因素研究. 硕士学位论文, 天津理工大学, 天津. 34–36.]

Wu QB, Wang XK, Duan XN, Deng LB, Lu F, Ou-yang ZY, Feng ZW (2008). Carbon sequestration and its potential by forest ecosystems in China. *Acta Ecologica Sinica,* 28, 517–524. (in Chinese) [吴庆标, 王效科, 段晓男, 邓立斌, 逯非, 欧阳志云, 冯宗炜 (2008). 中国森林生态系统植被固碳现状和潜力. 生态学报, 28, 517–524.]

Yang XH, Wu B, Zhang JT, Lin DR, Chang SL (2005). Progress of research into carbon fixation and storage of forest ecosystems. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science),* 41, 172–177. (in Chinese) [杨洪晓, 吴波, 张金屯, 林德荣, 常顺利 (2005). 森林生态系统的固碳功能和碳储量研究进展. 北京师范大学学报(自然科学版), 41, 172–177.]

Ye JS, She GH (2010). Forest carbon dynamics in Guangdong province. *Journa l of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition),* 34(4), 7–12. (in Chinese) [叶金盛, 佘光辉 (2010). 广东省森林植被碳储量动态研究. 南京林业大学学报(自然科学版), 34(4), 7–12.]

Zhang WL, Zhang B, Yang CJ, Mei H, Dai QS (2013). Forest litter fall carbon storage estimation of Tibet. *Central South Forest Inventory and Planning,* 32(4), 12–15. (in Chinese) [张万林, 张蓓, 杨传金, 梅浩, 戴前石 (2013). 西藏自治区森林枯落物碳储量估算. 中南林业调查规划, 32(4), 12–15.]

Zhang WX, Zhou YD, Huang QL, Zhou YW, Mo LJ (2012). Advances in estimation of vegetation carbon stocks of forest ecosystem in China. *Guangdong Forestry Science and Technology,* 28(4), 50–55. (in Chinese) [张玮辛, 周永东, 黄倩琳, 周永文, 莫罗坚 (2012). 我国森林生态系统植被碳储量估算研究进展. 广东林业科技, 28(4), 50–55.]

Zhang XQ, Xu DY (2003). Potential carbon sequestration in China's forests. *Environmental Science & Policy,* 6, 421–432.

Zhao M, Zhou GS (2004). Carbon storage of forest vegetation and its relationship with climatic factors. *Scientia Geographica Sinica,* 24, 50–54. (in Chinese) [赵敏, 周广胜 (2004). 中国森林生态系统的植物碳贮量及其影响因子分析. 地理科学, 24, 50–54.]

Zhen W, Huang M, Zhai YL, Chen K, Gong YZ (2014). Variation of forest vegetation carbon storage and carbon sequestration rate in Liaoning province, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology,* 25, 1259–1265. (in Chinese) [甄伟, 黄玫, 翟印礼, 陈珂, 龚亚珍 (2014). 辽宁省森林植被碳储量和固碳速率变化. 应用生态学报, 25, 1259–1265.]

特邀编委: 杜 盛 责任编辑: 李 敏

doi: 10.17521/cjpe.2015.0152